

6 Conclusões e considerações finais

6.1 Conclusões

Nesta pesquisa foi realizada uma extensa revisão bibliográfica, apresentada no capítulo 3, procurando-se investigar questões relacionadas com a aplicação de métodos numéricos na solução de propagação de fraturas em maciços de rocha provocadas por explosões.

Especificamente, neste trabalho foi empregado o Método Estendido dos Elementos Finitos (*eXtended Finite Element Method* - XFEM) para representação do fenômeno, associado à aplicação do modelo constitutivo de zona coesiva para cálculo dos campos de tensão e deformação junto às pontas das fraturas. O método XFEM encontra-se implementado no software comercial ABAQUS v.6.14 utilizado nesta pesquisa, que faz uso da técnica de substituição de um elemento finito por dois outros elementos construídos com nós fantasmas, porém conservando as mesmas funções de interpolação dos elementos intactos, o que facilita sua implementação computacional em programas existentes. Adicionalmente, como no método XFEM não há representação física da fratura, atualizações de malha não são necessárias como no método convencional dos elementos finitos. Em consequência, soluções podem ser obtidas com menor esforço computacional e maior rapidez.

Dois exemplos de aferição foram utilizados para avaliar a adequabilidade e precisão dos três métodos aplicados neste trabalho: XFEM, elementos de interface coesiva e técnica de eliminação de elementos. Todos os resultados apresentaram dependência em relação à discretização das malhas, em graus variáveis, com melhor precisão numérica obtida às custas de maior esforço computacional. O XFEM apresentou melhor previsão da trajetória da fratura no modo misto, enquanto que a técnica de eliminação do elemento (TEE) forneceu repostas pouco precisas e altamente dependentes da discretização da malha. Além disso, o fator de retenção

de cisalhamento é um parâmetro que influencia muito na resposta da TTE, devendo ser prévia e cuidadosamente calibrado.

Uma deficiência do XFEM, como implementado no programa computacional Abaqus v.6.14, é a condição da fratura propagar totalmente através de um elemento finito em dado intervalo de tempo, o que requer a utilização de malhas bastante refinadas para acompanhar as trajetórias reais das fraturas.

Os exemplos analisados neste trabalho sugerem que o modelo computacional empregado produz resultados satisfatórios. Esta afirmação é feita do ponto de vista qualitativo, reforçada pela verossimilhança observada com alguns resultados experimentais disponíveis na literatura e de comparações com resultados anteriores obtidos por Lima (2001) com o método convencional dos elementos finitos.

A construção de um modelo operacionalmente eficiente levou em conta aspectos da análise dinâmica e de convergência do modelo de zona coesiva. Para impedir a formação de ondas de reflexão espúrias foram utilizados elementos infinitos e o método da penalidade foi empregado para evitar a penetração das superfícies de uma mesma fratura.

O carregamento nas paredes do furo considera a aplicação de um pulso de pressão transiente. Embora esta pressão deveria ser uma resposta do problema, mas para a simplificação do problema e para comparar com os trabalhos anteriores não foi levada em conta. Foram investigados o fraturamento dinâmico de maciços de rocha para vários pulsos de pressão, concluindo-se que o padrão de fraturamento é mais influenciado pelo tempo de ascensão do pulso até a pressão de pico do que pelo tempo de decaimento. A maior velocidade do carregamento eleva o número de fraturas radiais e intensifica os níveis de tensão ao redor das pontas das fraturas.

Foram feitas análises quanto à influência do número de fissuras preexistentes ao redor de um furo de detonação. Quanto ao esforço computacional, modelos sem fissuras preexistentes apresentam maior demanda de processamento. Com nenhuma ou 8 fissuras preexistentes (homogêneo ou heterogêneo) não ocorreram problemas de convergência em um único furo, mas problemas de convergência surgem quando dois ou mais furos são modelados, em decorrência de interseção de fraturas e distorção de elementos.

As influências de importantes parâmetros no padrão de fraturamento de rocha foram extensivamente investigadas. Verificou-se, por exemplo, que simulações realizadas com variação do módulo de elasticidade não interferem significativamente no comprimento das fraturas e que a consideração da variação da resistência à tração da rocha é um fator determinante. Ambos os fatores (módulo de elasticidade, resistência à tração) também foram estudados considerando a distribuição de densidades de probabilidade de Weibull com geração aleatória de valores no domínio da solução numérica.

No exemplo de aplicação com dois furos de detonação, foi comprovado comportamentos similares obtidos com o método XFEM e o método convencional dos elementos finitos empregado por Lima (2001). Comparações também foram efetuadas com a técnica de eliminação de elementos, porém esta representa mais um processo de fragmentação com a retirada de material (elementos) do que acompanhamento da evolução das fraturas no maciço rochoso. Conclui-se que com a técnica de eliminação de elementos um resultado grosseiro é obtido, além de ser muito sensível ao refinamento da malha. No obstante, por estar implementado no Abaqus no esquema explícito no tempo, tem um custo computacional baixo.

Um plano de fogo com 5 furos de detonação numa malha em V, com tempo de atraso de 25 μ s foi simulada pelo método XFEM. Muitos problemas de convergência foram encontrados que somente foram resolvidos, após várias tentativas, na utilização de uma nova malha tendo em vista que as dificuldades de convergência eram causadas por distorções excessivas de elementos. Chegou-se à conclusão que em estudos de fraturamento dinâmico a malha de elementos deve ser bem refinada e os incrementos de tempo pequenos.

Finalmente, o desenvolvimento desta tese, com a superação de diversas dificuldades numéricas, reforça a conclusão geral desta pesquisa de que o método XFEM é uma poderosa ferramenta para tratar de problemas envolvendo descontinuidades e singularidades, especialmente em situações complexas envolvendo carregamentos dinâmicos, como nos exemplos examinados neste trabalho.

6.2 Propostas para continuação desta pesquisa

Para o prosseguimento deste trabalho de pesquisa, são sugeridos os seguintes tópicos:

- Incorporar um modelo constitutivo que leve em consideração o comportamento elastoplástico da rocha para também simular a zona de esmagamento por compressão ao redor do furo de detonação;
- Incorporar a influência dos gases de detonação que pressurizam as paredes dos furos e das fraturas;
- Analisar o efeito de descontinuidades existentes no maciço rochoso, pois a orientação, geometria e material de preenchimento de juntas podem ter forte efeito nos padrões de fraturamento;
- Incorporar a dependência da taxa de deformação na definição da resistência dinâmica da rocha.